

# 卒業論文

## ホームネットワークにおけるデータ特性を考慮した SDNによる優先度制御手法

SDN Based Priority Control Method Considering Data Attributes  
for Home Network

同志社大学 理工学部 情報システムデザイン学科

2018 年度 1033 番

国本 典晟

指導教員

理工学部 情報システムデザイン学科  
ネットワーク情報システム研究室

佐藤 健哉 教授

2022 年 2 月 10 日

# 概要

SDN のホームネットワークへの適用が期待されているが、ホームネットワークには特性の異なるデータの通信が混在し、通信の種類と量が時間帯によって変動するため、それらの制御方法が課題となっている。現在のインターネットサービスプロバイダはデータ特性を考慮せず制御を行うため、通信帯域の逼迫の際に重要なパケットの損失などの問題が生じる。また、従来の優先度分類では、テレワークの増加などの昨今のリアルタイム性の高い通信の需要を十分に考慮できておらず、優先度が固定されていたため状況に応じた優先度制御が困難であった。本研究では、リアルタイム性を含むデータ特性から通信を4つに分類し、動的に優先度を設定し、優先度制御を行う手法を提案した。ホームネットワークを想定したネットワークを構築して実験を行い、先行研究と比較してリアルタイム性の点で改善し、状況に応じて優先すべき通信の性能が向上した。

## キーワード

1. SDN, 2. ホームネットワーク, 3. 分類アルゴリズム

# 目次

第1章	はじめに	1
1.1	背景	1
1.2	目的	1
1.3	本論文の構成	2
第2章	関連研究	3
2.1	遅延要件による優先度分類	3
2.2	帯域保証による優先度分類	3
第3章	提案手法	5
3.1	SDNによるネットワーク管理	5
3.2	通信の分類	6
3.3	アドミSSION制御	8
第4章	評価	11
4.1	評価環境	11
4.2	通信性能	12
4.3	動的な優先度分類	13
4.4	通信のリアルタイム性	16
第5章	考察	18
第6章	おわりに	20
	謝辞	21
	参考文献	22
	研究業績	23

# 第1章 はじめに

## 1.1 背景

Software-Defined Networking (SDN) とは、図 1 のようにネットワーク制御機能とデータ転送機能を分離し、データ転送機能のみをネットワーク機器に担わせ、外部のソフトウェアが一括してネットワークの制御を行う技術の総称である。SDN 登場以前、ルータなどのネットワーク機器はネットワークを制御する機能とデータを転送する機能を併せ持っていたため、ネットワークにおける制約が大きく、環境の変化に対応するのが困難であった。SDN により、ネットワークをソフトウェアで集中制御することで、ネットワークの仮想化、迅速・柔軟な変更、管理の効率化などが可能になり、企業ネットワークや Information and Communication Technology (ICT) システムなどに利用されている [1]。

一方、ホームネットワークの拡張や複雑化のため、SDN のホームネットワークへの適用が期待されている。ホームネットワークとは、PC やスマートフォン、Internet of Things (IoT) 機器などから構成される LAN 環境を家庭内に構築したものである。近年、画像や動画データなどの大容量データの需要の拡大や IoT 機器の普及に伴い、ホームネットワークとインターネット間の通信量が急速に増加し、通信帯域の逼迫が危惧されている [2]。現在、ホームネットワークとインターネット間の通信を管理しているインターネットサービスプロバイダ (ISP) は、通信の重要度や Quality of Service (QoS) 要件といった特性を考慮せず制御しているが、通信帯域が逼迫した際に重要なパケットの損失や QoS の低下などの問題が生じる恐れがある。この問題の解決のため、SDN を利用して ISP がホームネットワークを集約して最適化された帯域制御を行う方式が提案されている [3]。

ホームネットワークには、重要度や QoS 要件などのデータ特性の異なる通信が混在している。例えば、緊急事態を通知するデータは重要度が高いため遅延やパケットの損失が許されず、動画データは多少のパケットの損失は許されるが大きく遅延してはならない。また、近年ではテレワークの増加に伴い、切断されるとリアルタイム性が損なわれるデータの需要が高まっている。加えて、ホームネットワークはユーザや時間帯による通信の種類と量の変動が大きく、ユーザや家庭の状況によって通信の重要度や需要も変化する。こうした重要度や QoS 要件、リアルタイム性などのデータ特性が異なる通信を状況に応じて制御するには、データ特性から通信を分類して動的に優先度を設定し、SDN を用いて通信帯域に応じてパケットの破棄などを行う優先度制御が必要である。

## 1.2 目的

本研究では、ホームネットワークの制御において問題となるデータ特性が異なる通信や通信の種類と量の変動を解決するため、データ特性を考慮して通信を分類し、動的な優先度制御を行う手法を提案し、状況に応じた優先度の高い通信の品質を改善する。また、リアルタイム性を考慮し、優先度制御に伴うパケットの破棄による通信への影響を軽減することを目的とする。ホームネットワークを想定したネットワークを構築して実験を行い、提案手法の有効性を評価する。

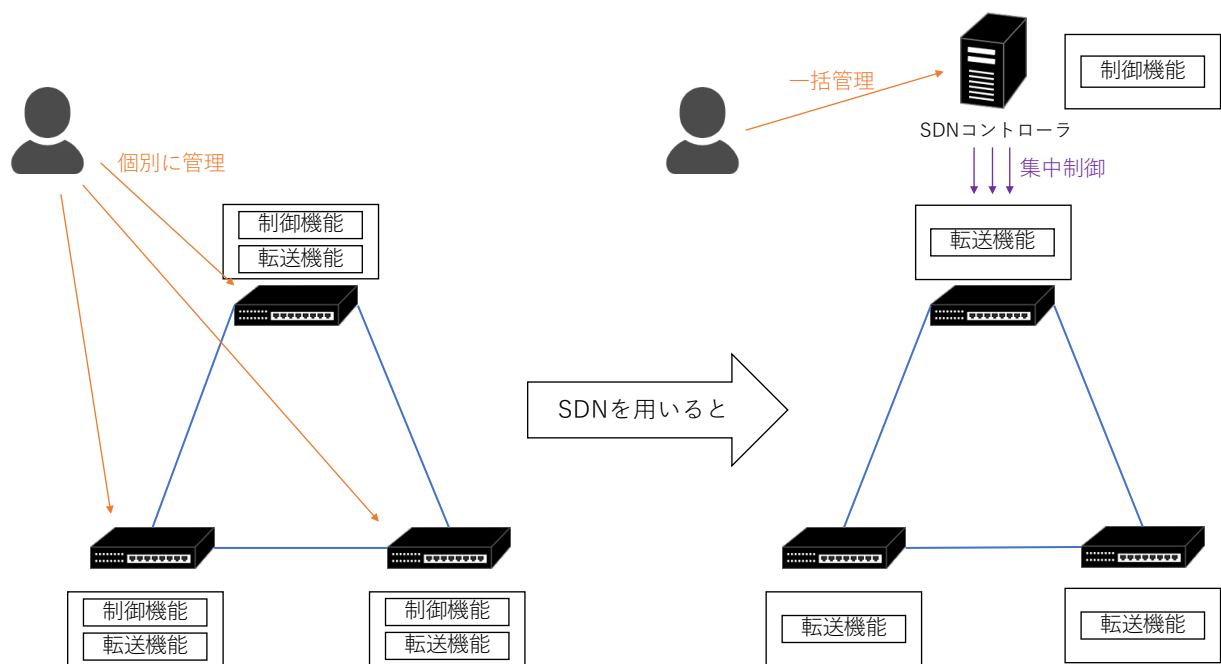


図 1: SDN の概要

### 1.3 本論文の構成

第2章では、SDNをホームネットワークに適用するために、通信の遅延要件や帯域保証を基準に優先度分類を行なった関連研究について述べる。第3章では、第2章で注目されたデータの特徴に合わせて、さらにリアルタイム性を考慮した通信の分類と、動的に優先度を設定し通信帯域に応じて優先度の低い通信のパケットを破棄するアドミSSION制御について述べる。第4章では、提案手法の有効性の評価のための実験方法とその評価結果について述べる。第5章では、実験によって得られた結果に対して考察を行う。第6章では、本論文のまとめを述べる。

## 第2章 関連研究

### 2.1 遅延要件による優先度分類

Jang らは、3GPP Long Term Evolution が定義した QoS Class Identifier (QCI) をホームネットワークの通信に適用できるよう、表 1 のように再定義した [3]. さらに、各 QCI の遅延要件 (表 1 の Packet Delay Budget) を基準にして通信を 3 つのカテゴリに分類し、各カテゴリに割り当てる通信帯域の割合を動的に変更することで、QoS と QoE (Quality of Experience) の改善を目指した [4].

しかし、通信帯域を割り当てるのみで、優先度の高い通信のために優先度の低い通信のパケットを破棄する優先度制御を行わないため、QCI=5 に示されるミッションクリティカルな通信のパケットが損失してしまう恐れがある. また、QCI=3 の通信と QCI=4 の通信を同様に制御するなど、通信のリアルタイム性を考慮しておらず、通信帯域が逼迫した際に通信品質への影響が懸念される.

### 2.2 帯域保証による優先度分類

Deng らは、Jang らの QCI を基に、帯域保証 (表 1 の Resource Type) を基準として優先度を分類した [5]. また、最も優先度の高い通信の QoS 要件を満たすため、優先度の低い通信のパケットを破棄するアドミッション制御を行なった. これにより、ミッションクリティカルな通信の QoS 要件を満たした.

しかし、2.1 節と同様に、QCI=3 と QCI=4 の通信を同じ優先度で制御しており、通信のリアルタイム性を考慮できていない. また、優先度分類の基準を帯域保証のみとしたため、遅延要件とパケットロス要件の厳しい QCI=7 の通信が最も優先度が低く分類されてしまっている. さらに、固定された

表 1: スマートホームサービス向けに再定義された QCI

QCI	Priority	Device type	Resource Type	Packet Delay Budget	Packet Error Loss	Example Services
1	2	Non-M2M	GBR	100ms	$10^{-2}$	Conversational voice
2	3	Non-M2M	GBR	50ms	$10^{-3}$	Real time gaming
3	4	Non-M2M	GBR	150ms	$10^{-3}$	Conversational video
4	5	Non-M2M	GBR	300ms	$10^{-6}$	Non-conversational video (Buffered streaming)
5	1	M2M	Non-GBR	60ms	$10^{-6}$	Mission critical delay sensitive data transfer
6	6	Non-M2M	Non-GBR	300ms	$10^{-6}$	Video (Buffered streaming) TCP-based (for example, www, email, chat, ftp, p2p and the like)
7	7	Non-M2M	Non-GBR	100ms	$10^{-3}$	Voice, Video (Live streaming), Interactive gaming
8	8	M2M	Non-GBR	N/A	$10^{-6}$	Non mission critical delay insensitive data transfer

優先度分類を元にアドミSSION制御を行うため、優先度分類と実際の通信の重要度や需要が異なる状況においても、固定された優先度分類において優先度が低い通信のパケットを破棄してしまう。

## 第3章 提案手法

本研究では，第2章で述べた，ミッションクリティカルな通信のパケットが損失する恐れがある問題や，通信のリアルタイム性を考慮していない問題，固定された優先度分類と通信の重要度や需要が異なる状況に対応できない問題を解決するために，リアルタイム性を含むデータ特性を考慮した通信の分類と，動的に優先度を設定し優先度の高い通信の品質を改善するアドミッション制御を提案する．本章では，まずSDNによるホームネットワークとISP間のネットワーク管理について述べ，その後通信の分類とアドミッション制御について述べる．

### 3.1 SDNによるネットワーク管理

ホームネットワークにはPCやスマートフォン，IoT機器など様々な通信機器が存在しているが，それらは図2のように，有線または無線で全て家庭用ルータに接続されており，家庭用ルータを介してインターネットに接続している．本論文では，このような家庭用ルータを「ゲートウェイ」と表記する．

ホームネットワークがインターネットに接続するには，図3に示すように，アクセスネットワークとISPを経由する必要がある．ホームネットワーク内で発生したデータは，アクセスネットワーク

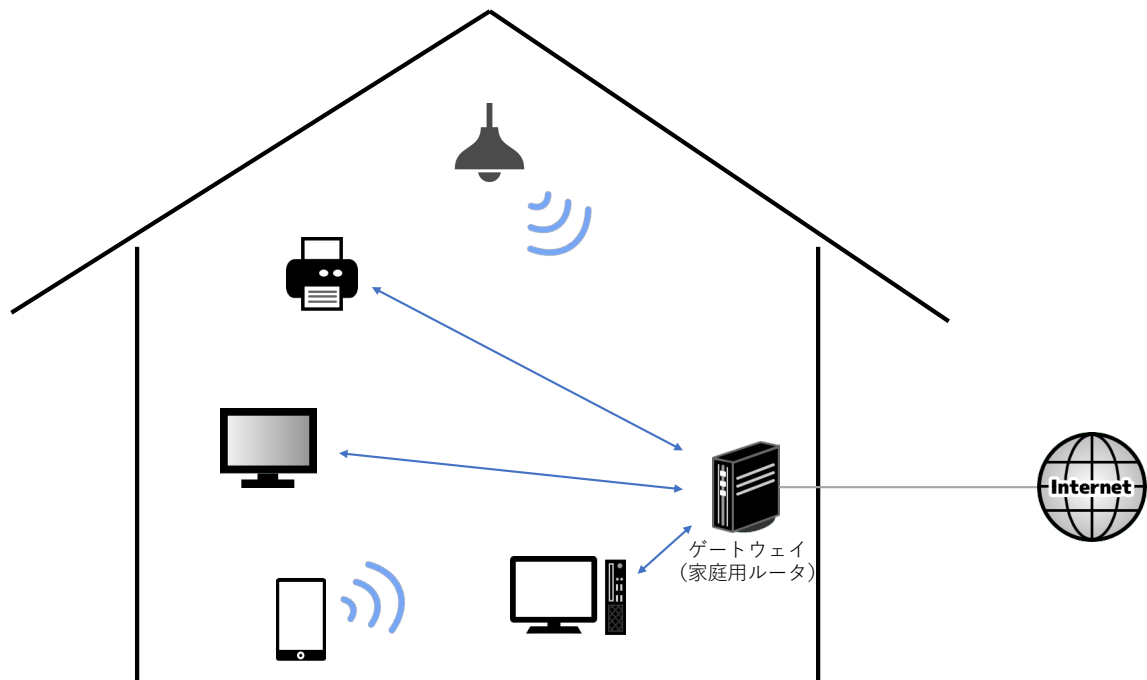


図 2: ホームネットワークの構造



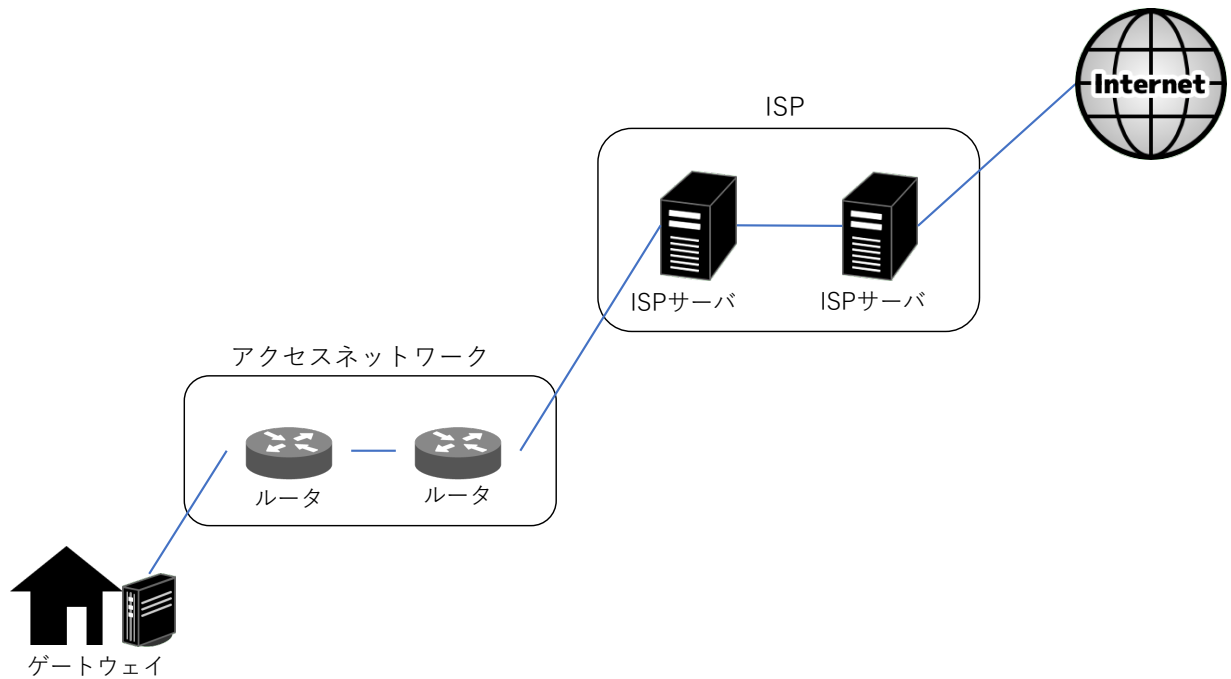


図 3: ホームネットワークとインターネット間のネットワーク

を經由し、ISP が管理するサーバへと到達する。ISP は、サーバにてホームネットワークで発生したデータをインターネットへ接続するための処理を行い、インターネットへデータを送信する。本論文では、アクセスネットワーク内のデータの中継機を「ルータ」、ISP が管理するサーバを「ISP サーバ」と総称する。

1.1 節で述べた通り、SDN とはネットワーク制御機能とデータ転送機能を分離し、データ転送機能のみをネットワーク機器に任せ、外部のソフトウェアが一括してネットワークの制御を行う技術の総称である。ホームネットワークと ISP 間のネットワークに SDN を適用するには、データ転送機能を担うネットワーク機器とネットワーク制御機能を担うソフトウェアが必要となる。データ転送機能を担うネットワーク機器は、図 3 のゲートウェイ、ルータ、ISP サーバが該当する。ネットワーク制御機能を担うソフトウェアとして、新たに SDN コントローラを配置する。SDN によるネットワーク管理を図 4 に示す。SDN コントローラはゲートウェイ、ルータ、ISP サーバと接続しており、これらとネットワーク制御に必要なメッセージをやりとりすることで、ネットワーク全体の制御を行う。また、SDN コントローラは、アクセスネットワークの通信帯域やホームネットワークの状況に応じて、3.2 節で述べる通信の分類を、3.3 節で述べるように優先度を設定しアドミSSION制御をゲートウェイに指示する。ゲートウェイは、SDN コントローラの指示に従いアドミSSION制御を行う。

## 3.2 通信の分類

ホームネットワークには重要度や QoS 要件、リアルタイム性など、データ特性の異なる通信が混在している。SDN を用いてホームネットワークの通信を制御するために、以下のようにデータ特性を基準として通信を 4 種類のカテゴリに分類する。

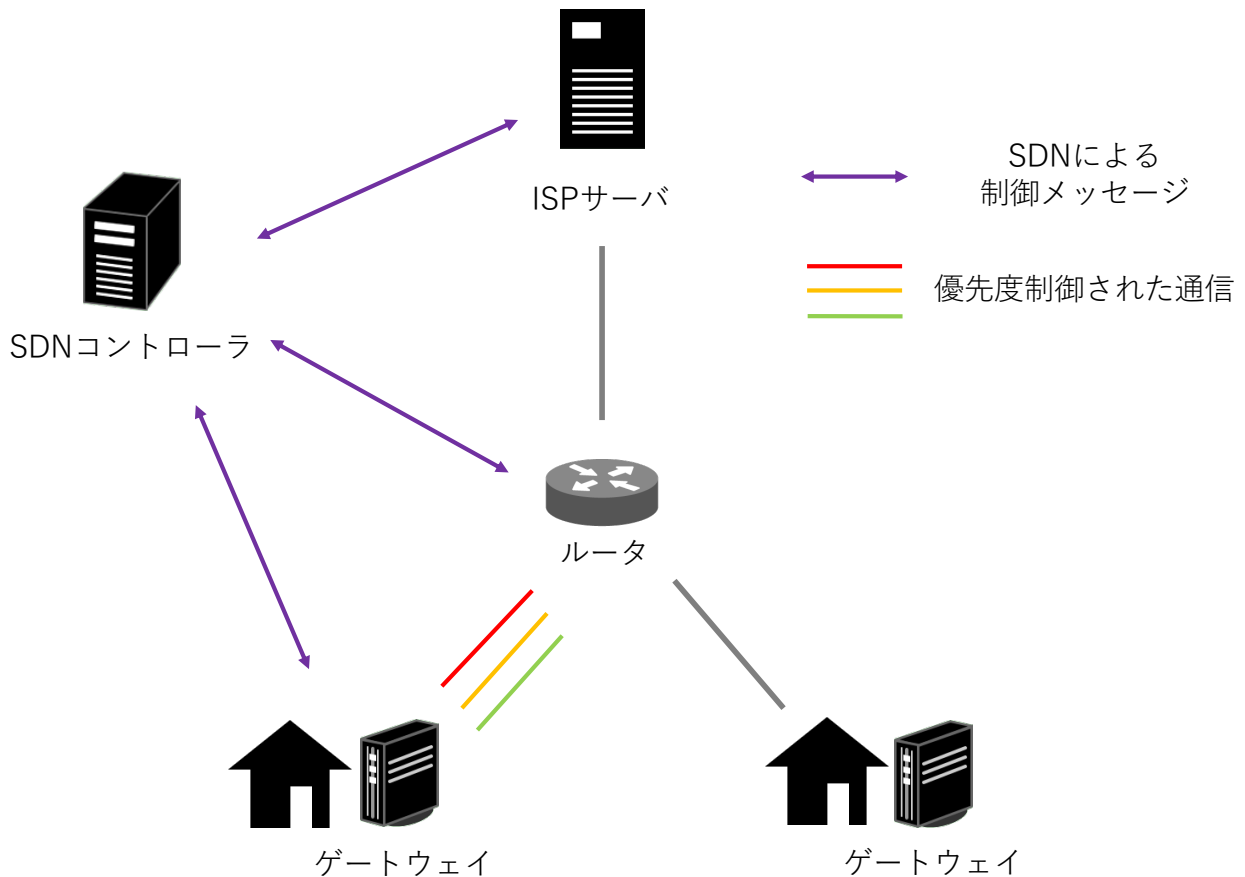


図 4: SDN によるネットワーク管理

#### カテゴリ 1

カテゴリ 1 には、火災報知器や侵入者センサなどのミッションクリティカルなデータの通信が該当する。ミッションクリティカルなデータは、遅延やパケットの損失が、生命の危機などの重大な事態につながる恐れがある。また、ミッションクリティカルなデータは通常データサイズが小さく、あまり通信帯域を消費しない。以上のことから、カテゴリ 1 は通常、最も高い優先度に設定される。

#### カテゴリ 2

カテゴリ 2 には、音声通話や Web 会議などのリアルタイム性の高い音声・映像データの通信が該当する。音声・映像データは、遅延が大きい場合やパケットの損失が多い場合には、音声・映像が止まる、途切れるなどの恐れがある。また、音声通話や Web 会議などは人同士のコミュニケーションに用いられるためリアルタイム性が高く、これらの通信が途切れるとテレワークに支障をきたすなどの問題が発生する。以上のことから、カテゴリ 2 は通常、2 番目に高い優先度に設定される。

#### カテゴリ 3

カテゴリ 3 には、録画された動画などのリアルタイム性の低い音声・映像データの通信が該当する。カテゴリ 3 の音声・映像データの通信が途切れた場合、音声・映像の視聴が一時妨げられるなどの問題が発生するが、カテゴリ 2 と比較して通信品質への影響が小さい。以上のことから、カテゴリ 3 は通常、3 番目に高い優先度に設定される。

## カテゴリ 4

カテゴリ 4 には、Web サイトなどの TCP による通信や室温センサなどの非ミッションクリティカルなデータの通信が該当する。これらの通信は遅延やパケットの損失の影響がカテゴリ 1~3 の通信と比較して小さく、通信が途切れても通信品質にあまり影響しない。以上のことから、カテゴリ 4 は通常、最も低い優先度に設定される。

## 3.3 アドミッション制御

3.2 節で述べた通り、カテゴリ 1 の通信のデータはミッションクリティカルであるため、遅延やパケットの損失が許されない。また、カテゴリ 2 の通信はリアルタイム性が高いため、遅延や切断の影響が大きい。ホームネットワークと ISP サーバ間の通信帯域が逼迫した場合、カテゴリ 1 またはカテゴリ 2 の通信の遅延やパケットの損失の恐れがあるため、優先度の低い通信のフローを破棄することで、カテゴリ 1 またはカテゴリ 2 の通信のための通信帯域を確保するアドミッション制御を行う。

SDN を実現する代表的な技術である OpenFlow では、宛先 IP アドレスや宛先 MAC アドレス、宛先ポート番号などのルールが同じ通信の集合体を「フロー」と呼び、通信をフローごとに制御している。データ転送機能を担うネットワーク機器はフロー情報を内部に保存し、受信したパケットをフロー情報を参照して処理する。受信したパケットが保存しているフロー情報のいずれにも合致しない時、または必要に応じて、SDN コントローラはネットワーク機器に新たなフロー情報を送信し、ネットワーク機器はそのフロー情報に従い処理を行う。ここでは、SDN コントローラは、カテゴリ 1 またはカテゴリ 2 の通信に十分な通信帯域がない場合、優先度の低い通信のフローを破棄するようゲートウェイに指示することでアドミッション制御を行う。

カテゴリ 1 の通信のためのアドミッション制御のフローチャートを図 5 に示す。SDN コントローラはゲートウェイと ISP サーバ間の通信帯域を監視し、一定周期ごとにカテゴリ 1 またはカテゴリ 2 の通信に十分な通信帯域があるか確認する。カテゴリ 1 の通信に十分な通信帯域がなく、かつカテゴリ 2 の通信に十分な通信帯域がない場合、カテゴリ 3 またはカテゴリ 4 の通信のフローから破棄するフローを選択する。カテゴリ 1 の通信に十分な通信帯域がなく、カテゴリ 2 の通信に十分な通信帯域がある場合、カテゴリ 2~4 の通信のフローから破棄するフローを選択する。その後、SDN コントローラは選択したフローを破棄するようゲートウェイに指示し、ゲートウェイは指示に従いフローを破棄する。カテゴリ 1 の通信に十分な通信帯域がある場合でも、図 6 に示すフローチャートのように、カテゴリ 2 の通信に十分な通信帯域がない場合には、カテゴリ 3~4 の通信のフローを破棄するアドミッション制御を行う。

破棄するフローは基本的に優先度の低い通信のフローから選択する。しかし、ただ優先度の最も低いフローばかり選択していると、同じフローが破棄され続ける飢餓状態に陥る恐れがある。飢餓状態を防ぐため、各フローの破棄された回数を記録し、破棄するフローの選択に用いる。破棄するフローを選択する式を次に示す。

$$\text{Min}(w_2dc_2, w_3dc_3, w_4dc_4) \quad (1)$$

ここで、 $w_2$ ,  $w_3$ ,  $w_4$  は各カテゴリの通信に設定された重み、 $dc_2$ ,  $dc_3$ ,  $dc_4$  は各カテゴリの通信のフローが破棄された回数を表す。重みの大小関係は  $w_2 > w_3 > w_4$  であり、優先度の高い通信のフローほど破棄するフローに選択されづらい。フローが破棄された回数  $dc$  が増加するほど、そのフローが

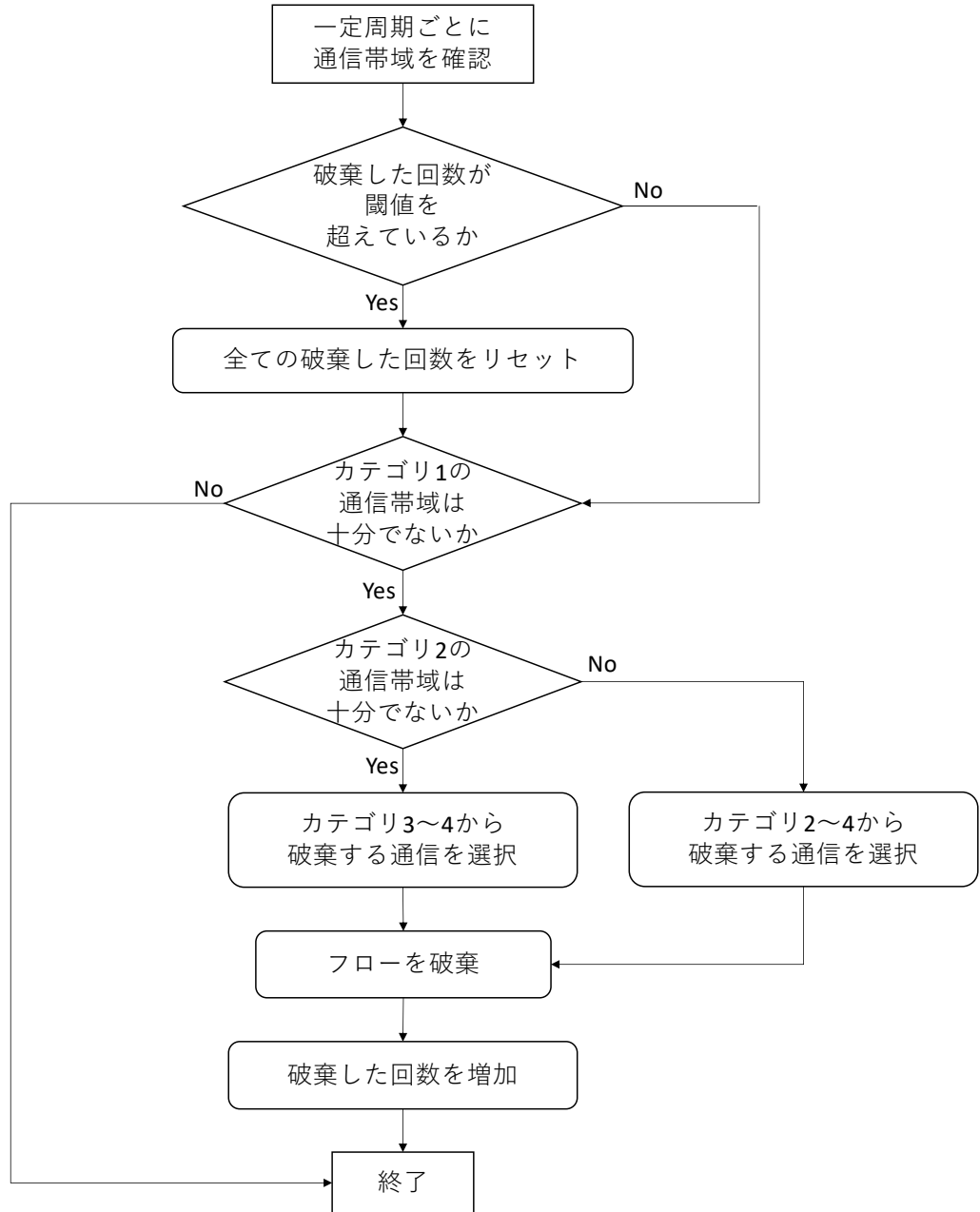


図 5: カテゴリ 1 のためのアドミッション制御のフローチャート

飢餓状態に近づいていることを意味するため、 $dc$  の増加に従い破棄するフローに選択されづらくなっている。

$dc$  を初期化せずに放置すると、 $dc$  の値は大きくなるが  $dc_2$ ,  $dc_3$ ,  $dc_4$  のそれぞれの差が小さくなるため、重み  $w$  の影響が小さくなってしまう。そのため、 $dc$  に閾値を設定し、 $dc_2$ ,  $dc_3$ ,  $dc_4$  のいずれかが閾値を超えた際に  $dc$  をリセットする。

また、ホームネットワークのユーザや家庭の状況によっては、カテゴリ 4 の優先度の方がカテゴリ 3 の優先度より高くなる場合が発生する。例えば、火災が発生した場合、火災そのものを検知するカテゴリ 1 の通信に加えて、温度センサによって火の手がどこまで回っているかを把握することができるカテゴリ 4 の通信も重要であり、この時カテゴリ 3 よりもカテゴリ 4 の優先度の方が高く設定され

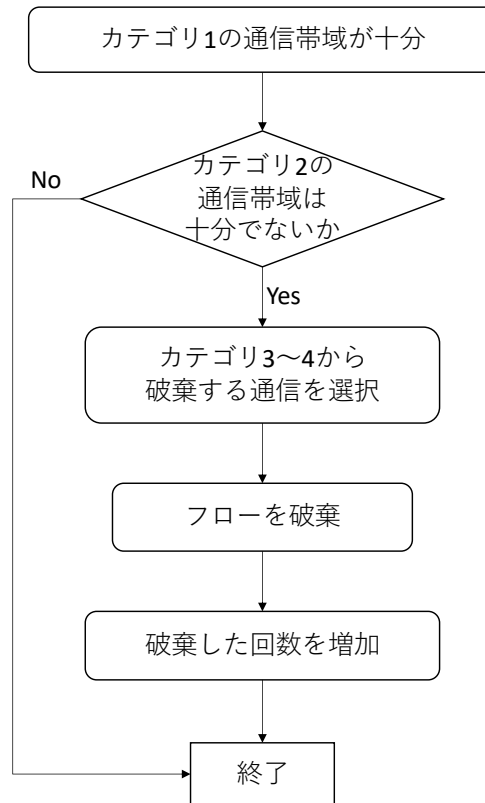


図 6: カテゴリ 2 のためのアドミSSION制御のフローチャート

るべきである。優先度の変更が必要になった場合、カテゴリ 3 に設定されていた  $w_3$ ,  $dc_3$  とカテゴリ 4 に設定されていた  $w_4$ ,  $dc_4$  の値を入れ替えることで、カテゴリ 4 の通信よりもカテゴリ 3 の通信が破棄するフローとして選択されやすくなる。

## 第4章 評価

### 4.1 評価環境

提案手法の有効性を評価するにあたり、ネットワークエミュレータである Mininet [6] を用いてホームネットワークと ISP サーバ間のネットワークを想定したネットワークを構築し、ネットワークシミュレーションを行った。構築したネットワークの構成を図 7 に示す。

4つのデバイスおよび ISP サーバは Mininet のホスト、ゲートウェイは Mininet の Open VSwitch として実装した。4つのデバイスはゲートウェイと接続しており、それぞれカテゴリ 1~4 の通信を行う。ゲートウェイはルータを経由せず、直接 ISP サーバと接続している。通常、ホームネットワークと ISP サーバ間の通信帯域はホームネットワーク内の通信帯域に比べて、デバイスまたはホームネットワークの数が少ない場合、提案する優先度制御にはルータの有無は影響しないため、上記のネットワーク構成によりシミュレーションを行なった。ゲートウェイは SDN コントローラと接続し、優先度制御に必要なメッセージをやり取りする。SDN コントローラには、SDN 構築フレームワークである Ryu [7] を用いた。

提案手法の有効性を評価するため、通信帯域が逼迫した際に優先度が高い通信の性能を測定する。

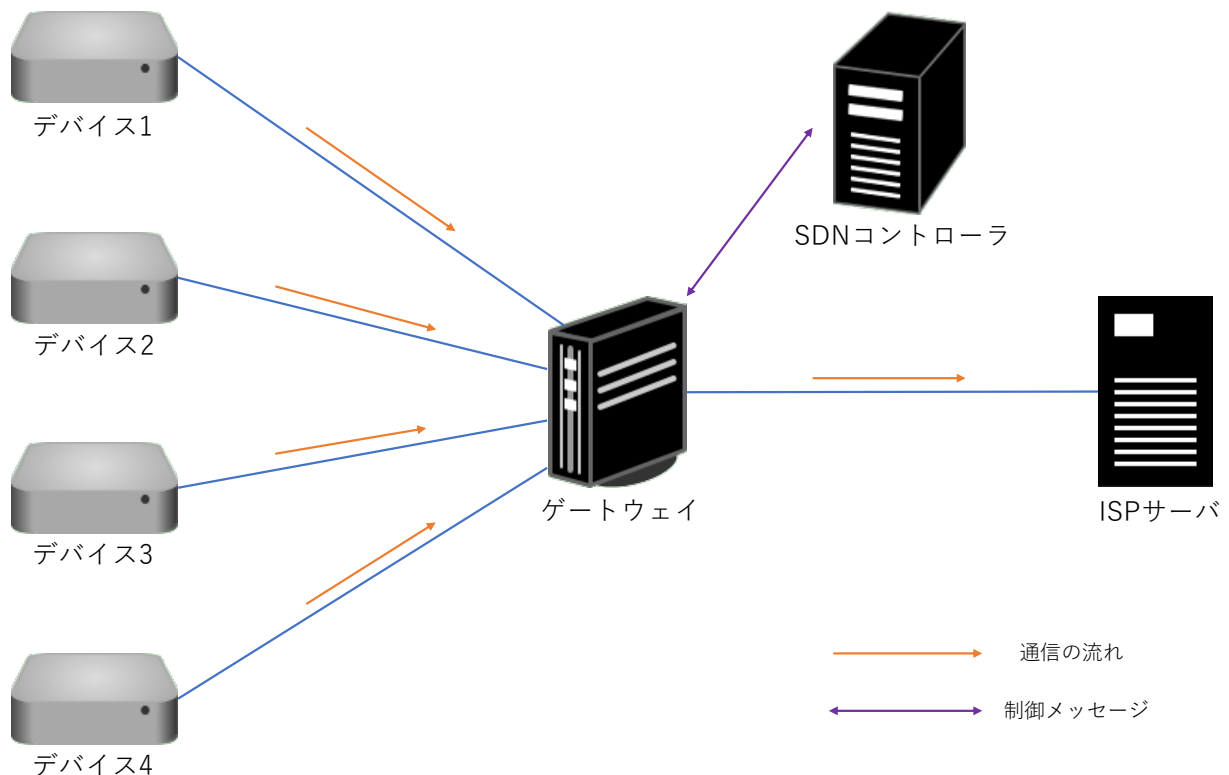


図 7: シミュレーションを行なったネットワーク構成

表 2: 各デバイスのパケット送信パラメータ

送信間隔	1000ms
データサイズ	34464Byte
パケット数	500

表 3: 各ポートの通信量の閾値

カテゴリ 1	100000Byte
カテゴリ 2	1000000Byte
カテゴリ 3	1000000Byte
カテゴリ 4	100000Byte

通信帯域の逼迫を再現するため、各デバイスとゲートウェイ間のリンクおよびゲートウェイと ISP サーバ間のリンクの通信帯域を 1Mbps に制限する。そして、TCP/IP パケットジェネレータおよびアナライザである hping3 [8] を用いて、各デバイスから ISP サーバへとパケットを送信する。パケット送信パラメータを表 2 に示す。

SDN コントローラは、各デバイスが接続されているゲートウェイの 4 つのポートが受信する通信量を監視し、15 秒おきにアドミSSION制御を行うか否かを決定する。各ポートごとに通信量の閾値を設定し、アドミSSION制御の決定間隔の 15 秒間で各ポートが受信した総通信量が閾値を超えた場合、そのポートに接続されているデバイスの通信を行うのに十分な通信帯域がないと見なし、そのポートが行っている通信の優先度に応じてアドミSSION制御が行われる。各ポートの閾値を表 3 に示す。SDN コントローラは 3.3 節に示した式を用いて破棄するフローを選択し、ゲートウェイにフローの破棄を指示する。指示を受けたゲートウェイは、そのフローを受信しても ISP サーバへ送信せず破棄する。次に 15 秒経過して、アドミSSION制御を行うか否かを判断する前に、破棄されていたフローを再度ゲートウェイに登録する。アドミSSION制御の結果破棄するフローに再度選ばれた場合は、連続してフローが破棄される。別のフローが選択された場合は、先ほどまで破棄されていたフローの通信は再開され、新たに選択されたフローの通信が切斷される。破棄するフローの選択には、3.3 で述べた通り破棄された回数も優先度と同時に用いる。ここでは、各カテゴリの重みの初期値を  $w_2 = 3$ ,  $w_3 = 2$ ,  $w_4 = 1$  とした。

通信帯域が逼迫した際に優先度の高い通信の品質を改善できているかを評価するため、各優先度の通信のデバイスから ISP サーバまでの実効スループット、デバイスがパケットを送信してからその応答がデバイスに返ってくるまでの遅延時間、送信するパケットの損失率を測定し、提案手法を用いない場合と比較する。また、優先度の動的な設定の有効性を評価するため、カテゴリ 3 とカテゴリ 4 の優先度が入れ替わった場合において、提案手法と固定された優先度分類を用いた優先度制御の実効スループット、遅延時間、パケットロス率を測定し比較する。さらに、リアルタイム性を考慮して分類したカテゴリ 2 とカテゴリ 3 について、破棄されたパケットのシーケンス番号を比較し、パケットの連続性からリアルタイム性について評価する。

## 4.2 通信性能

提案手法を用いた場合と優先度制御を行わなかった場合との実効スループットの比較を図 8 に示す。ここで、最も優先度が高い順に各通信を優先度 1~4 とし、それぞれカテゴリ 1~4 に対応する。提

案手法を用いた場合の優先度 1 の実効スループットは 228.84Mbps, 優先度 2 の実効スループットは 200.35Mbps, 優先度 3 の実効スループットは 143.37Mbps, 優先度 4 の実効スループットは 98.33Mbps であった。一方, 優先度制御を行わない場合の優先度 1 の実効スループットは 163.59Mbps, 優先度 2 の実効スループットは 212.3Mbps, 優先度 3 の実効スループットは 216.89Mbps, 優先度 4 の実効スループットは 218.73Mbps であった。

提案手法を用いた場合と優先度制御を行わなかった場合との遅延時間の比較を図 9 に示す。提案手法を用いた場合の優先度 1 の平均遅延時間は 8634.0ms, 優先度 2 の平均遅延時間は 8601.9ms, 優先度 3 の平均遅延時間は 8342.6ms, 優先度 4 の平均遅延時間は 8536.4ms であった。また, 優先度制御を行わない場合の優先度 1 の平均遅延時間は 9026.7ms, 優先度 2 の平均遅延時間は 9392.9ms, 優先度 3 の平均遅延時間は 9256.6ms, 優先度 4 の平均遅延時間は 9486.7ms であった。

提案手法を用いた場合と優先度制御を行わなかった場合とのパケット損失率の比較を図 10 に示す。提案手法を用いた場合の優先度 1 のパケット損失率は 17%, 優先度 2 の平均遅延時間は 28%, 優先度 3 の平均遅延時間は 48%, 優先度 4 のパケット損失率は 65% であった。一方, 提案手法を用いた場合の優先度 1 のパケット損失率は 41%, 優先度 2 の平均遅延時間は 23%, 優先度 3 の平均遅延時間は 22%, 優先度 4 のパケット損失率は 21% であった。

### 4.3 動的な優先度分類

カテゴリ 3 とカテゴリ 4 の優先度が入れ替わった場合, すなわちカテゴリ 1=優先度 1, カテゴリ 2=優先度 2, カテゴリ 4=優先度 3, カテゴリ 3=優先度 4 の場合について, 提案手法を用いて動的に優先度分類を行なった通信性能と固定された優先度分類を用いた通信性能を比較する。提案手法

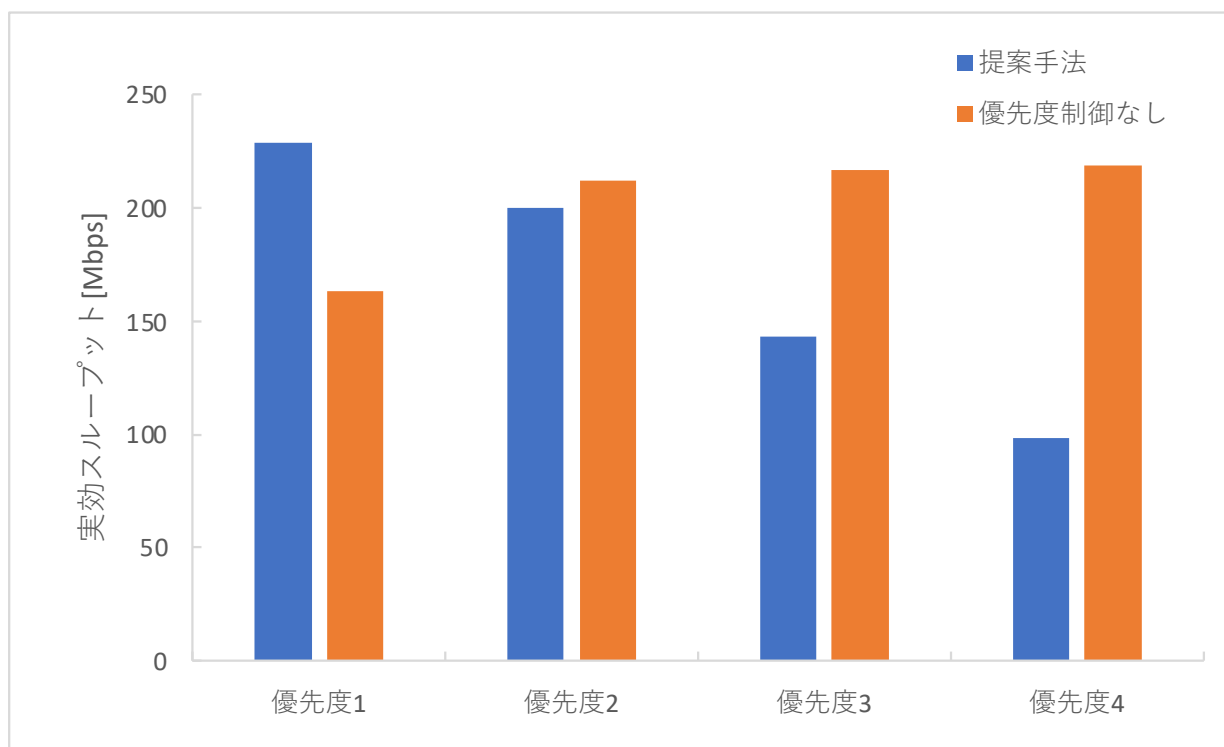


図 8: 優先度制御しない場合との実効スループットの比較



を用いた場合と固定された優先度分類を用いた場合との実効スループットの比較を図 11 に示す．提案手法を用いた場合の優先度 1 の実効スループットは 246.98Mbps，優先度 2 の実効スループットは 204.03Mbps，優先度 3 の実効スループットは 182.89Mbps，優先度 4 の実効スループットは 99.26Mbps であった．一方，優先度制御を行わない場合の優先度 1 の実効スループットは 240.79Mbps，優先度 2 の実効スループットは 194.84Mbps，優先度 3 の実効スループットは 103.85Mbps，優先度 4 の実効スループットは 172.78Mbps であった．

提案手法を用いた場合と優先度制御を行わなかった場合との遅延時間の比較を図 12 に示す．提案手法を用いた場合の優先度 1 の平均遅延時間は 6704.9ms，優先度 2 の平均遅延時間は 6532.8ms，優先度 3 の平均遅延時間は 6816.8ms，優先度 4 の平均遅延時間は 6561.3ms であった．また，優先度制御を行わない場合の優先度 1 の平均遅延時間は 6802.5ms，優先度 2 の平均遅延時間は 6834.7ms，優先度 3 の平均遅延時間は 6276.8ms，優先度 4 の平均遅延時間は 6745.1ms であった．

提案手法を用いた場合と優先度制御を行わなかった場合とのパケット損失率の比較を図 13 に示す．提案手法を用いた場合の優先度 1 のパケット損失率は 10%，優先度 2 の平均遅延時間は 26%，優先度 3 の平均遅延時間は 34%，優先度 4 のパケット損失率は 64% であった．一方，提案手法を用いた場合の優先度 1 のパケット損失率は 13%，優先度 2 の平均遅延時間は 30%，優先度 3 の平均遅延時間は 63%，優先度 4 のパケット損失率は 38% であった．

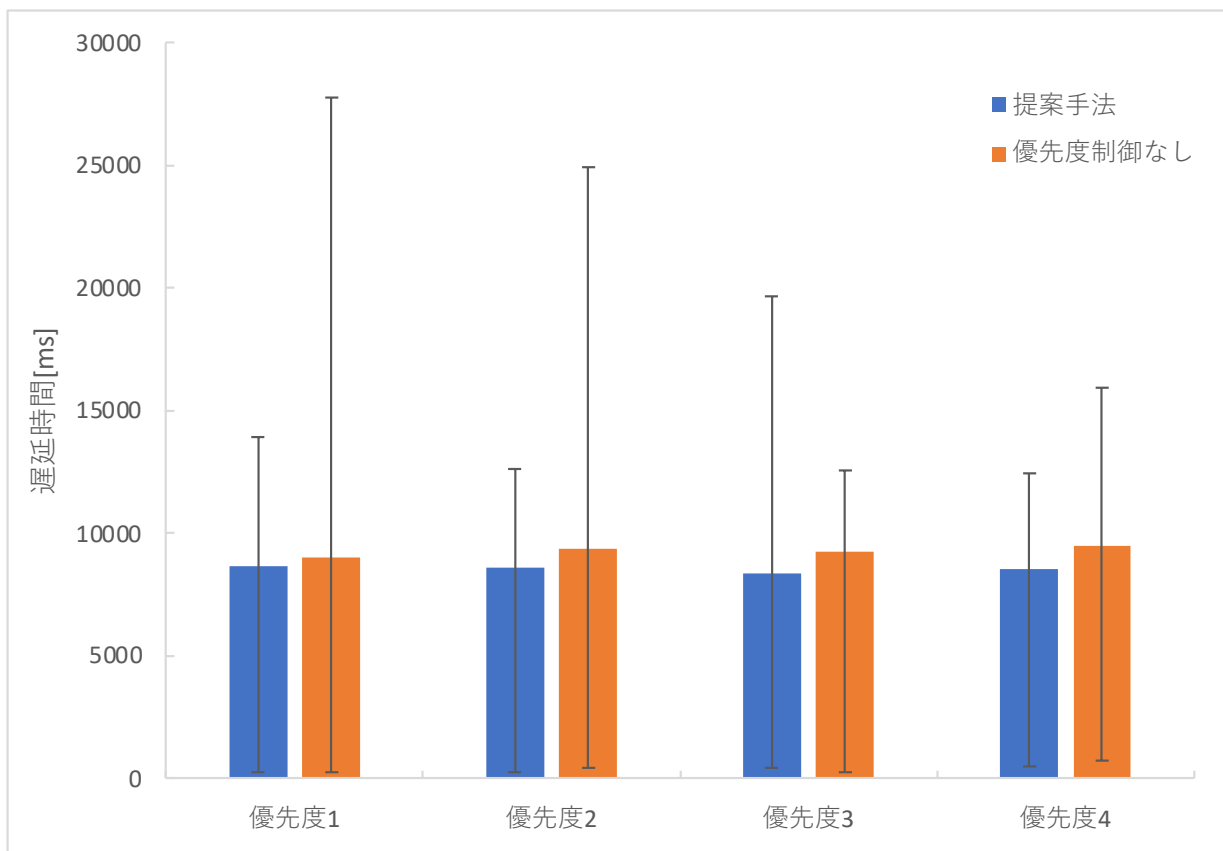


図 9: 優先度制御しない場合との遅延時間の比較

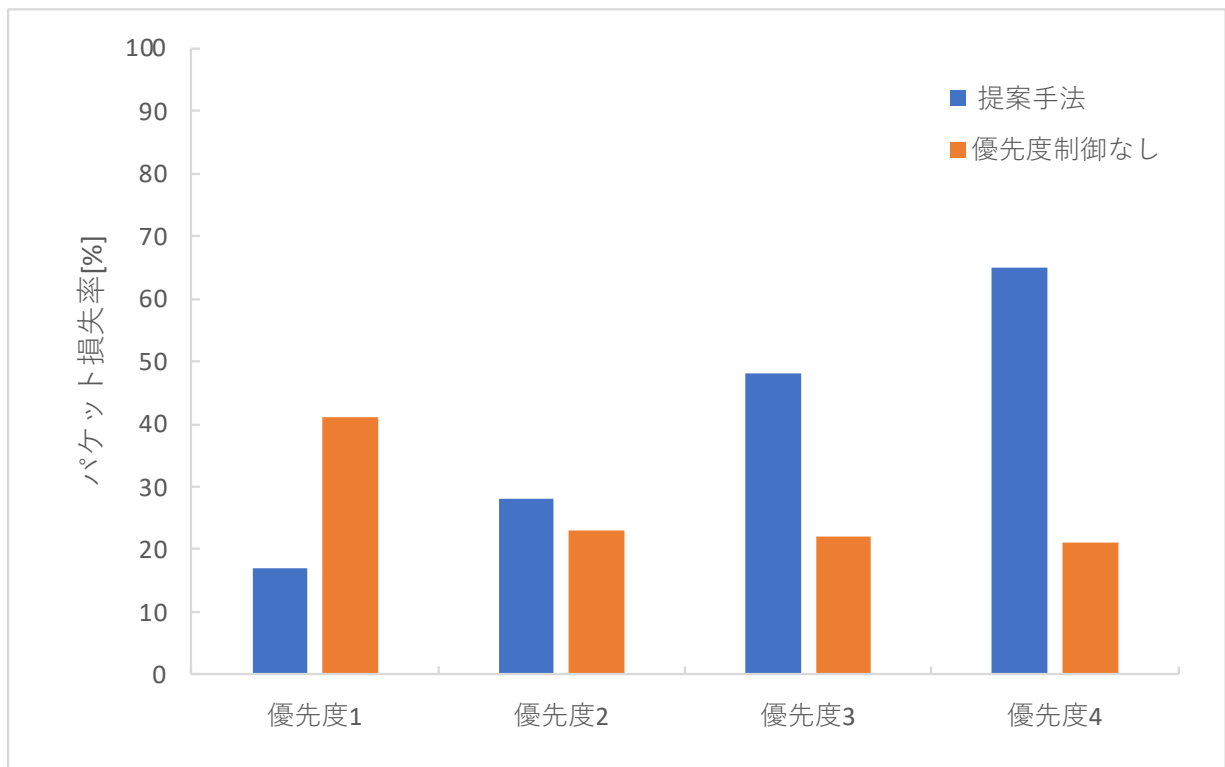


図 10: 優先度制御しない場合とのパケット損失率の比較

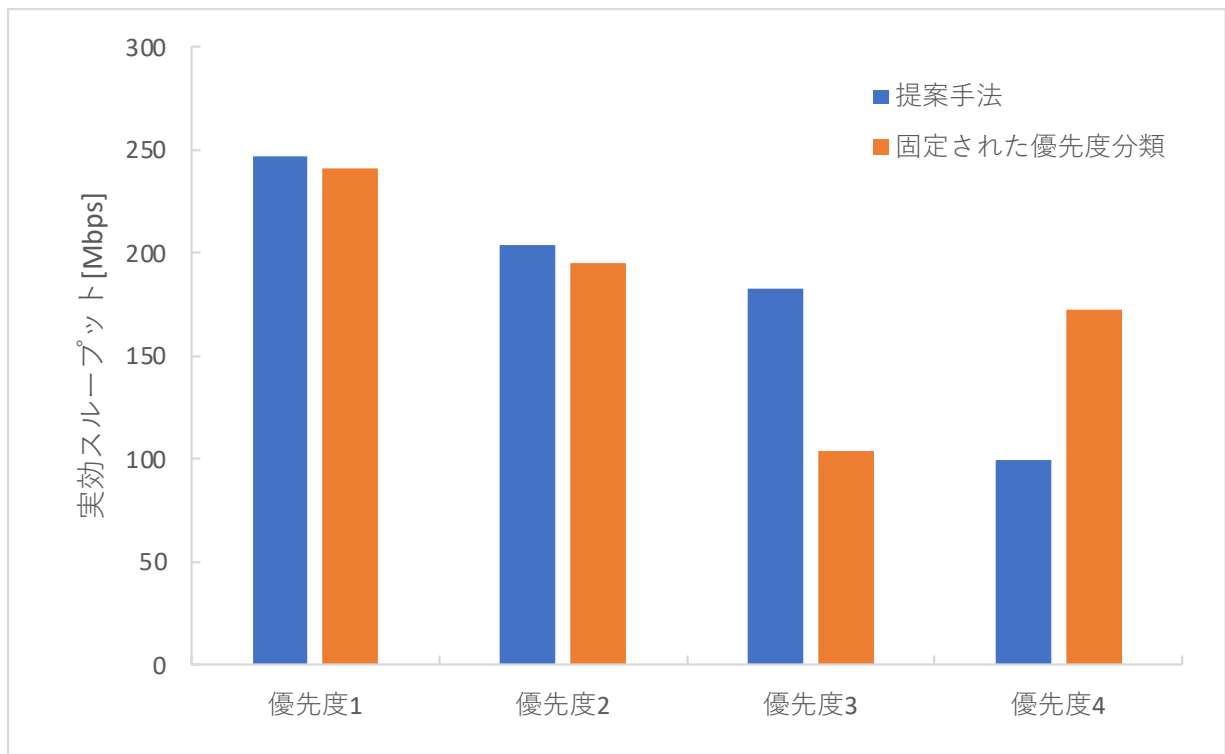


図 11: 固定された優先度分類との実効スループットの比較

## 4.4 通信のリアルタイム性

3.2 節で，リアルタイム性の点から音声・映像データの通信をカテゴリ 2 とカテゴリ 3 に分類した．カテゴリ 2 とカテゴリ 3 のそれぞれの破棄されたパケットのシーケンス番号を比較することで，パケットの連続性からリアルタイム性を評価する．それぞれのパケットが到達/破棄されたシーケンス番号を図 14 に示す．パケット到達の値が 1 の時はパケットが正常に到達しており，0 の時はパケットが破棄されていることを表す．カテゴリ 2 では 1 回の連続した破棄を含む 6 回の破棄があったのに対して，カテゴリ 3 では 1 回の連続した破棄を含む 7 回の破棄があった．

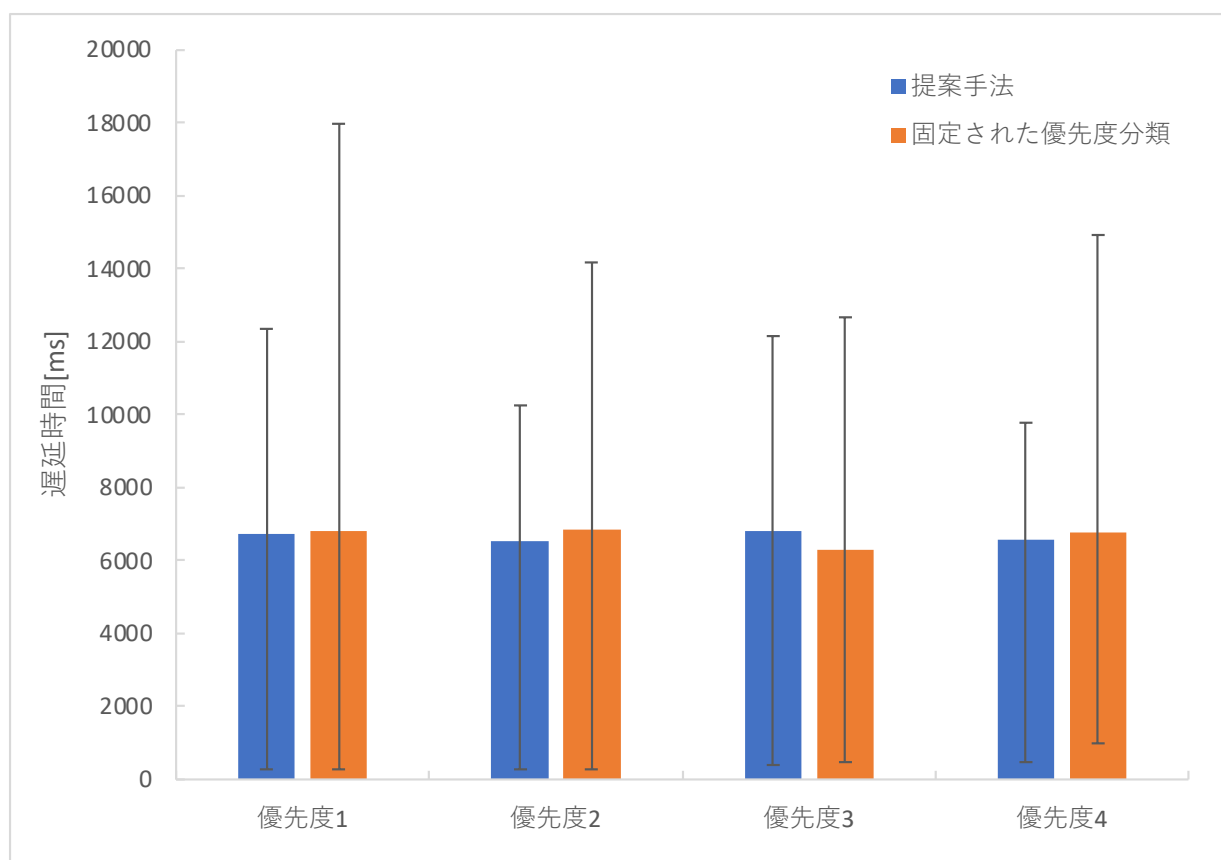


図 12: 固定された優先度分類との遅延時間の比較

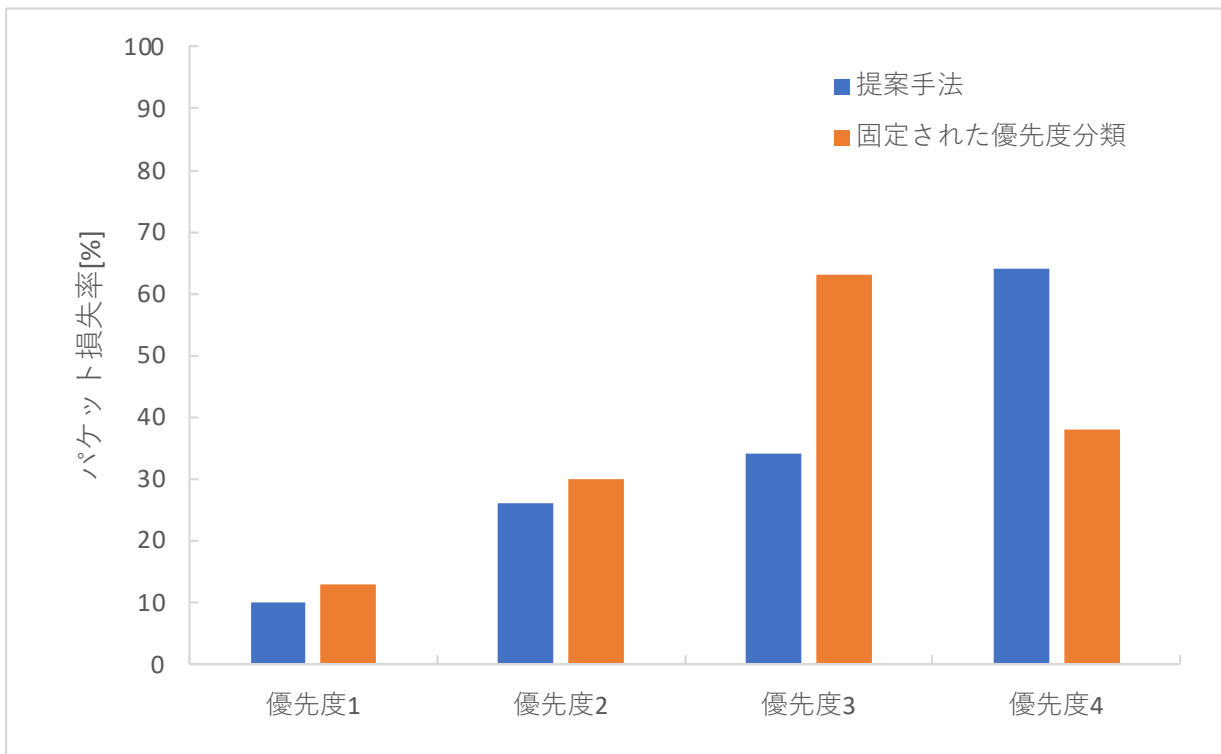


図 13: 固定された優先度分類とのパケット損失率の比較

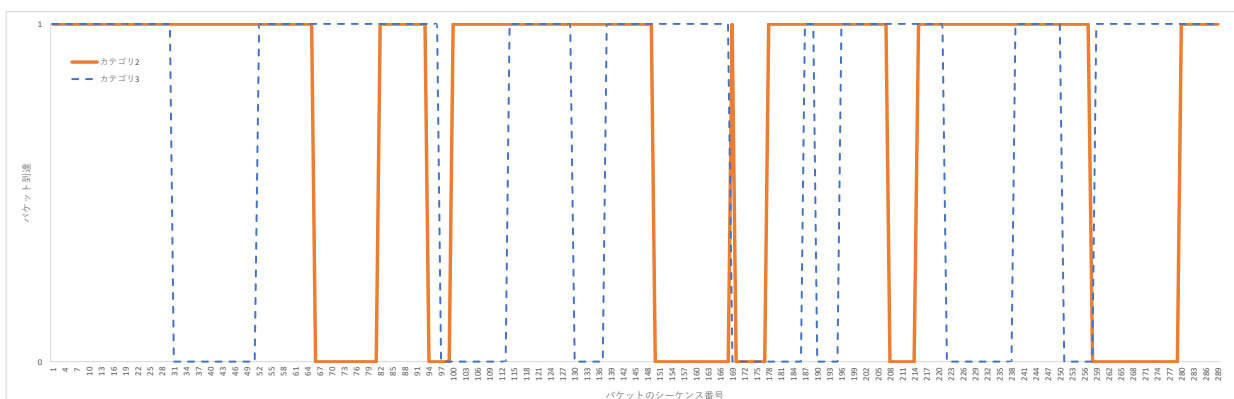


図 14: パケットの到達/破棄

## 第5章 考察

ここでは、4章で述べた結果をもとに提案手法を考察する。4.2節の結果をもとに、優先度制御の有効性を考察する。次に、4.3節の結果から、動的な優先度分類の有効性を考察する。また、4.4節の結果をもとに、カテゴリ2とカテゴリ3のリアルタイム性を比較し分析する。

図8に示すように、最も優先度の高い優先度1の通信のスループットは、提案手法を用いた場合の方が優先度制御しない場合と比較して向上している。しかし、優先度2~4の通信ではスループットが低下しており、通信全体のスループットは低下している。また、図10に示すように、優先度1の通信のパケット損失率は改善しているが、優先度2~4の通信のパケット損失率は増加した。これは、提案手法では各ポートに設定した通信量の閾値を超えた際にアドミッション制御を行うため、まだ通信帯域が逼迫しきっておらず、パケットを送信する余裕があったがパケットを破棄してしまったことが原因と考察される。一方、優先度制御を用いない場合は、通信帯域の限界のみでしかパケットの損失が発生しないため、提案手法を用いた場合と比較して通信全体の実効スループットとパケット損失率は高い品質を示した。アドミッション制御を、通信量の閾値をもとに行うのではなく、通信帯域の逼迫率をもとに行うことで、実効スループットとパケット損失率の改善が可能である。

図9に示すように、デバイスがパケットを送信してからその応答がデバイスに返ってくるまでの遅延時間は、提案手法を用いた場合が優先度制御しない場合と比較して軽減した。これは、優先度制御を用いない場合では、通信帯域が逼迫した際にTCPの確認応答と再送制御が行われるため遅延時間が増加するのに対して、提案手法では通信量が閾値を超えた場合にパケットが破棄されるため、確認応答と再送制御がそもそも行われず、その分遅延時間が軽減されていると考察される。通信帯域の逼迫率を監視し、パケットの到達が見込めない時はパケットを破棄することで、遅延時間を軽減することが可能である。

次に、提案手法の動的な優先度分類について考察する。図11に示すように、提案手法を用いた場合では優先度の変更に合わせてアドミッション制御を行なったため、カテゴリ4=優先度3の実効スループットがカテゴリ3=優先度4の実効スループットよりも高くなっている。一方、固定された優先度分類では、カテゴリ4=優先度3の実効スループットがカテゴリ3=優先度4の実効スループットよりも低くなっており、優先度の変化に対応できていない。また、パケット損失率についても、提案手法ではカテゴリ4=優先度3のパケット損失率がカテゴリ3=優先度4のパケット損失率よりも低下しているのに対して、固定した優先度分類ではカテゴリ4=優先度3のパケット損失率がカテゴリ3=優先度4のパケット損失率より高くなっている。動的な優先度分類によって、優先度の変更に対応した優先度制御を実現した。

しかし、遅延時間については、図12からわかるように、提案手法を用いた場合、固定された優先度分類を用いた場合ともに、カテゴリ4=優先度3とカテゴリ3=優先度4で動的な優先度分類が有効に作用した結果は見られない。提案手法を用いた場合の遅延時間は固定された優先度分類を用いた場合の遅延時間と比較して最大遅延時間や平均遅延時間が軽減されているが、どちらも図9の提案手法を用いた場合の遅延時間より小さいことから、誤差の範囲内であると考察される。上で考察したよ

うにパケットの破棄が遅延時間の軽減に繋がるため、実際のホームネットワークで長時間の動的な優先度制御では遅延時間の軽減が可能である。

最後に通信のリアルタイム性について考察する。図 14 に示すように、リアルタイム性の高い音声・映像データの通信であるカテゴリ 2 ではリアルタイム性の低い音声・映像データの通信であるカテゴリ 3 と比較して、パケットが破棄された回数が 1 回少なく、パケット到達が 1 の値を連続してとる時間も長いことから、提案手法ではカテゴリ 2 のリアルタイム性を向上できている。3.3 の式に示した  $w_2$  の値を調整することで、通信帯域やホームネットワークの状況に応じたリアルタイム性の向上が可能である。

## 第6章 おわりに

ホームネットワークの拡張や複雑化に伴い、SDNのホームネットワークへの適用が期待されている。ホームネットワークにはデータ特性が異なる通信が混在するため、データ特性から通信の優先度を分類し、通信帯域に応じて優先度制御を行う必要がある。また、ホームネットワークはユーザや時間帯による通信の種類と量の変動が大きく、ユーザや家庭の状況によって通信の重要度や需要も変化するため、優先度分類を動的に行う必要がある。これまで提案された優先度分類ではリアルタイム性が考慮されておらず、通信帯域の逼迫や優先度制御に伴うパケットロスの通信への影響が大きかった。また、固定された優先度分類を用いていたため、優先度に変更が求められる状況に対応した優先度制御ができなかった。

本論文では、重要度やQoS要件、リアルタイム性といったデータ特性から通信を4つのカテゴリに分類した。また、通信帯域が逼迫した際に、通信の優先度に対応した重みとこれまで破棄された回数から新たに破棄するアドミSSION制御を提案した。さらに、優先度の変更が必要な際には、通信の優先度に対応した重みとこれまで破棄された回数をカテゴリ間で入れ替えることで、動的な優先度分類を提案した。

ホームネットワークを想定したネットワークを構築し、ネットワークシミュレーションを行うことで提案手法の有効性を検証した。優先度制御を行わない場合と比較して、優先度の高い通信の実効スループットとパケット損失率を改善した。また、固定された優先度分類と比較して、優先度に変更があった場合でも、動的に優先度分類を行い優先度に応じた優先度制御を実現した。さらに、リアルタイム性を考慮して分類した通信について、パケットの破棄された回数や連続して到達した時間からリアルタイム性の向上を示した。

## 謝辞

本研究を進めるにあたって，多大なご指導とご支援を賜りました同志社大学理工学部 of 佐藤健哉教授に心より感謝いたします．また，研究内容について親身にアドバイスをくださった山本浩太郎先輩をはじめとしたネットワーク情報システム研究室のみなさまには，大変お世話になりました．さらに，学校生活や研究活動を支えて支えてくれた友人と家族へ感謝いたします．



## 参考文献

- [1] NEC, [https://jpn.nec.com/sdn/about\\_sdn.html](https://jpn.nec.com/sdn/about_sdn.html) (参照:2022/1).
- [2] 総務省, 帯域制御の運用基準に関するガイドライン (改定). 2019.
- [3] Hung-Chin Jang, Chi-Wei Huang and Fu-Ku Yeh, Design A Bandwidth Allocation Framework for SDN Based Smart Home, *2016 IEEE 7th Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON)*, pp. 1-6, 2016.
- [4] Hung-Chin Jang and Jian-Ting Lin, SDN Based QoS Aware Bandwidth Management Framework of ISP for Smart Homes, *2017 IEEE SmartWorld, Ubiquitous Intelligence & Computing, Advanced & Trusted Computed, Scalable Computing & Communications, Cloud & Big Data Computing, Internet of People and Smart City Innovation (SmartWorld/SCALCOM/UIC/ATC/CBDCOM/IOP/SCI)*, pp. 1-7, 2017.
- [5] Guo-Cin Deng and Kuochen Wang, An Application-aware QoS Routing Algorithm for SDN-based IoT Networking, *2018 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, pp. 186-191, 2018.
- [6] Mininet.
- [7] Ryu.
- [8] hping3.

## 研究業績

- [1] 国本 典晟, 細野 航平, 滕 睿, 佐藤 健哉, "ホームネットワークにおけるデータ特性を考慮した SDN による優先度制御手法, " 情報処理学会 第 84 回全国大会. 2022. (発表予定)